

**А. А. Кононов<sup>1</sup>, М. А. Матвеев<sup>2\*</sup>, П. С. Жителев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры имени Д. В. Ефремова, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург

\*matveev\_ma@inbox.ru

## **ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ ПОЛОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ**

В работе показано, что формирование структуры поверхностных слоев горячекатаной полосы из электротехнической анизотропной стали происходит в результате совместного действия фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  и динамической рекристаллизации, центральных слоев — в результате протекания процесса возврата деформированных зерен. Установлено, что неоднородная по толщине горячекатаной полосы структура формируется из-за неоднородного развития фазового превращения.

*Ключевые слова:* электротехническая анизотропная сталь, текстура Госса, горячая прокатка, фазовое превращение.

**A. A. Kononov, M. A. Matveev, P. S. Zhitelev**

## **EVOLUTION OF STRUCTURE OF HOT ROLLED GRAIN-ORIENTED SILICON STEEL STRIP**

It's shown that the surface layers structure of the grain-oriented silicon steel hot-rolled strip formats as a result of the two processes: phase transformation  $\gamma \rightarrow \alpha$  and dynamic recrystallization. Formation of the central layers — as a result of the deformed grains recovery. It is established that the inhomogeneous through thickness of the structure forms in the hot-rolled strip due the non-uniform phase transformation.

*Key words:* grain-oriented silicon steel, Goss texture, hot rolling, phase transformation.

**Г**орячекатаная полоса анизотропной электротехнической стали имеет сильную структурную неоднородность: поверхностные слои состоят из почти равноосных зерен феррита, центральные — из вытянутых в направлении прокатки. Во время горячей прокатки в поверхностных слоях полосы образуются зерна с госсовской ориентировкой [1–3]. Чем острее ориентировка  $\{110\}<001>$  в горячекатаной полосе, тем совершеннее текстура в готовом листе ЭАС [4]. В настоящее время нет полного понимания механизма формирования структуры и текстуры

горячекатаной полосы [5–6]. В связи с этим в данной работе исследовали механизмы формирования структуры при горячей прокатке ЭАС.

В работе исследовали электротехническую сталь трех химических составов, отличающихся содержанием кремния и углерода (мас. %): 1) Fe — 3,2 % Si — 0,035 % C; 2) Fe — 3,2 % Si — 0,025 % C; 3) Fe — 1,3 % Si — 0,04 % C, — что обеспечило получение различного содержания  $\gamma$ -фазы в структуре стали при температурах горячей прокатки. Режимы лабораторной прокатки сведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы лабораторной прокатки

	Температура прокатки, °С		$\varepsilon_{\text{пр}}$ , %	$n_{\text{пр}}$	$\varepsilon_{\text{сум}}$ , %	$t_{\text{пауз}}$ , сек	$F_{\gamma}$ , %	Состав
	начала	конца						
1	1200	1100	50	4	91	300	13	1
2	1100	1000	50	4	92	300	19	1
3	1000	950	50	4	90	300	12	1
4	1100	1000	25	7	85	300	19	1
5	1100	1000	50	4	92	30	19	1
6	1100	800	50	3	84	0	19	1
7	1100	1000	50	4	92	300	9	2
8	1100	1000	50	4	91	300	90	3

*Примечание.*  $\varepsilon_{\text{пр}}$  — обжатия за проход;  $n_{\text{пр}}$  — количество проходов;  $\varepsilon_{\text{сум}}$  — суммарные обжатия;  $t_{\text{пауз}}$  — время выдержки в печи между проходами;  $F_{\gamma}$  — доля  $\gamma$ -фазы в металле при температуре начала прокатки.

Прокатка по режиму № 1 приводит к развитию в металле сквозной рекристаллизованной структуры из-за высокой температуры прокатки 1200 °С. При прокатке по режимам 2 и 3 в стали формируется неоднородная по толщине проката структура: в поверхностных слоях — равноосные зерна феррита, в центральных — вытянутые в направлении прокатки (рис. 1, а). Толщина слоя равноосных зерен составляет 20–25 % от толщины образца. Снижение температуры прокатки приводит к измельчению зерна в поверхностных слоях. Снижение температуры прокатки приводит к уменьшению интенсивности протекания процессов рекристаллизации в металле. При этом, со снижением температуры расширения зоны, не наблюдается нерекристаллизованных вытянутых в направлении прокатки зерен. Одним из отличий условий прокатки между режимом 1 и режимами 2–3 является то, что в первом случае в металле в каждом проходе протекает превращение  $\alpha \rightarrow \gamma$ , а во втором —  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Именно фазовое превращение  $\gamma \rightarrow \alpha$  является одним из условий формирования неравномерной по толщине структуры горячекатаной полосы ЭАС.

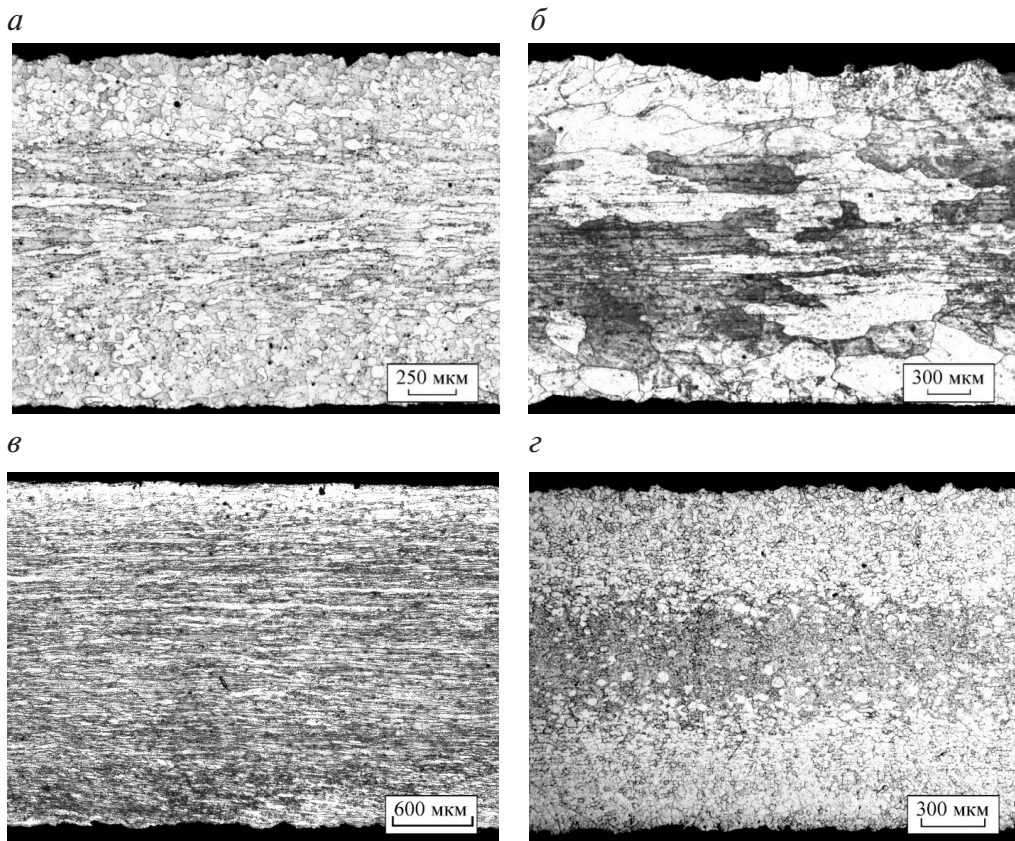


Рис. 1. Структура металла в продольном сечении после прокатки по: режиму 2 (а), 4 (б), 6 (в) и 8 (г)

Снижение степени деформации за проход (режим 4) приводит к формированию сквозной деформированной структуры (рис. 1, б), поскольку такой степени деформации недостаточно для начала динамической рекристаллизации. Следовательно, необходимым условием для формирования равноосных зерен в поверхностных слоях полосы ЭАС при горячей прокатке является протекание в них динамической рекристаллизации. Уменьшение междеформационных пауз при прокатке (режимы 5–6) приводит к уменьшению разогрева поверхностных захоложенных слоев металла между проходами и, следовательно, к снижению интенсивности протекания превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$ . Поэтому доля  $\gamma$ -фазы в полосе во время паузы не восстанавливается и во время деформации после паузы снижается интенсивность фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$ , что приводит к формированию в металле деформированной структуры (рис. 1, в), т. е. при отсутствии фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  во время прокатки динамическая рекристаллизация не развивается.

Таким образом, формирование полигонального феррита в поверхностных слоях горячекатаной полосы ЭАС происходит в результате действия двух процессов, протекающих совместно: фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  и динамической рекристаллизации. При отсутствии условий для протекания хотя бы для одного из этих процессов, происходит формирование деформированной структуры.

Фазовый состав металла при прокатке по режиму 7 близок к фазовому составу металла при прокатке по режиму 3. В результате, при прокатке по этим режимам, сформировалась близкая структура, несмотря на разницу в температуре прокатки. При прокатке металла в условиях высокого содержания аустенита (режим 8), во всем объеме образца сформировалось равноосное зерно, которое имеет различный размер в центральных и поверхностных слоях (рис. 1, з). Прокатка по режимам 7–8 подтвердила роль фазового превращения в формировании структуры горячекатаной полосы.

На основании результатов исследования установлено, что неоднородная по толщине горячекатаной полосы анизотропной электротехнической стали структура формируется из-за неоднородного развития фазового превращения. В поверхностных слоях фазовое превращение  $\gamma \rightarrow \alpha$  протекает интенсивнее, чем в центральных. Установлено, что полигональный феррит при горячей прокатке исследуемых сталей формируется в результате совместного протекания фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  и динамической рекристаллизации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1587.2017.8.*

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Лобанов М. Л. Управление структурой и текстурой электротехнической анизотропной стали с нитридным ингибированием : дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург : УрФУ, 2010. 238 с.
- 2 Лифшиц Б., Новиков В., Рощина Л. Изучение структуры кристалла (110) [001] кремнистого железа при начальной стадии первичной рекристаллизации // ФММ. 1969. Т. 27. № 6. С. 865–869.
- 3 Orientation Evolutions During Hot Rolling of Electrical Steel Containing Initial Columnar Grains / P. Yang [and etc.] // Materials Science Forum. 2012. V. 702–703. P. 754–757.
- 4 Гольдштейн В. Я., Пашенко С. В., Гражданкин С. Н. Структурообразование при горячей прокатке сплава Fe 3 % Si // ФММ. 1980. Т. 50. № 6. С. 1213–1217.
- 5 Decker B., Harker D. Relations between initial and final orientations in rolling and annealing of silicon ferrite // Journal of Applied Physics. 1951. V. 22. № 7. P. 900–904.
- 6 Лифанов В. Прокатка трансформаторной стали. М. : Металлургия, 1975. 200 с.